

Diferentes modelos de estimativa da radiação de onda longa a partir de dados MODIS/TERRA

Francineide Amorim Costa Santos¹
Bernardo Barbosa da Silva²
Carlos Antonio Costa dos Santos³
Alexandra Chaves Braga⁴

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG/UACA
Caixa Postal 58.429 – 140 – Campina Grande – PB - Brasil
francyacs@dca.ufcg.edu.br
bernardo@dca.ufcg.edu.br
carlos@dca.ufcg.edu.br
abraga@dca.ufcg.edu.br

Abstract: The objective of this study is to analyze the accuracy of different methods to estimate the surface downwelling and upwelling longwave radiation (LWR) using data from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) onboard the satellite Terra. For downwelling LWR three methods were used which is conventionally called SEBAL (S), METRIC (M) and Bisht (B). For application of the methods SEBAL and METRIC need only data for air temperature, which is easily obtained from the weather station. The method proposed by Bisht was processed in a completely autonomous form because the air temperature, as well as the dew temperature, were obtained from MODIS/ TERRA data. The upwelling LWR was estimated from a single mode, only with remote sensing data. The SEBAL method demonstrated greater accuracy, followed by METRIC, with standard deviations of 19 and 20 Wm^{-2} , respectively. Finally, the Bisht method showed that errors introduced were above the acceptable precision (36 Wm^{-2}). It was also examined the emissivities estimated by each method, as well as their impact on the accuracy of longwave radiation data. It is observed that the performance not so satisfactory of the Bisht methodology is due to estimate of the atmosphere emissivity, whose performance was not as good as the others. This is due to the fact of that the air temperature data obtained of the MODIS sensor were 2 – 3° higher than air temperature measured on the meteorological towers.

Keywords: remote sensing , emissivities, accuracy, estimates, sensoriamento remoto, emissividades, precisão, estimativas.

1. INTRODUÇÃO

O saldo de radiação (R_n) na superfície da Terra tem grande importância nos processos de evaporação, fotossíntese e aquecimentos do solo e do ar, e pode ser quantificado mediante a contabilidade entre os fluxos radiativos ascendentes e descendentes, incluindo onda longa e curta. A sua quantificação é fundamental para estudar as interações terra-atmosfera (Bisht et al., 2010). Dessa forma, é de grande importância investigar alterações que possam ser estabelecidas nas componentes do Balanço de Radiação (BR) à superfície, especialmente no que diz respeito ao aumento de temperatura da superfície e albedo, que impactam diretamente a transferência de massa (água e CO_2) para a atmosfera.

Bastiaanssen et al. (1998) citam que a equação do balanço de radiação é descrita em termos do balanço de onda curta e do balanço de onda longa, sendo o saldo de radiação de onda longa função da temperatura do ar e da temperatura da superfície.

Segundo Wang e Liang (2009), o balanço de radiação de onda longa, regional e global da superfície, só pode ser estimado através de dados de satélites, o que proporciona suficiente resolução espacial e temporal com dados a um baixo custo. Para estimativas baseadas em

dados de satélites a precisão aceitável é de $\pm 20 \text{ Wm}^{-2}$ para fluxos radiativos instantâneos e de $\pm 10 \text{ Wm}^{-2}$ para uma grade mensal (Gupta et al., 2004; Suttles e Ohring, 1986).

O objetivo do presente estudo é analisar o desempenho de três diferentes metodologias na estimativa da radiação de onda longa incidente, importante componente do BR, utilizando imagens do sensor MODIS a bordo do satélite Terra.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área estudada localiza-se no estado de São Paulo e abrange o município de Santa Rita do Passa Quatro (21°42'37"sul; 47°28'41"oeste; 748 m). O município pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu, que integra a Unidade de Gerenciamento das Bacias Hidrográficas dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo e formam, no contexto regional, um dos mais importantes polos socioeconômicos do interior do estado (BRASIL – MME, 2000). O clima da região é normalmente ameno e seco no inverno e quente e úmido no verão (ROCHA et al., 2002), com temperatura média anual inferior a 22°C, pluviosidade anual acima de 1.300 mm e, durante o verão, temperatura média mensal superior a 22°C (Pivello et al., 1998).

Utilizaram-se dados coletados numa torre micrometeorológica instalada em numa área de 351 hectares de cana-de-açúcar (variedade SP83-2847), num talhão cultivado com soca de cana-de-açúcar com espaçamento entre linhas de 1,5 m e altura média de 3,5 por ocasião da colheita, localizada na Fazenda São José do Pulador, Usina Santa Rita (21° 38'13" S; 47° 47'25" W; 552 m) (Gomes, 2009) no município de Luiz Antonio, SP.

2.1 - Produtos MODIS-Terra

As imagens MODIS são adquiridas no formato HDF (Hierarchical Data Format) e pode-se utilizar o software MRT (MODIS Reprojection Tool) para convertê-las no formato GeoTIFF, para posterior processamento com o programa Erdas 9.2. A área de estudo está inserida no tile v11_h13.

As imagens MODIS – Terra, selecionadas para a pesquisa, são referentes aos dias sequenciais do ano – DSA 46, 52, 70, 89, 100, 102, 212, 228, 338 e 360, do ano de 2005, adquiridas no endereço: <https://wist.echo.nasa.gov/api/>. Todas estas imagens foram reprojctadas para 1000 m.

O Quadro 1 descreve os produtos MODIS utilizados no presente estudo, com os fatores de correção (multiplicativo e ou adicional) que são empregados para converter os valores originais em dados de temperatura (K), emissividade (adimensional), reflectância (adimensional), dentre outros.

Quadro 1 - Descrição dos produtos MODIS utilizados

Produto	Descrição	Fator Multiplicativo	Fator adicional	Resolução (espacial e temporal)	Unidades
MOD11A1	Temperatura da superfície	0,02	-	1000 m diária	Kelvin
	Emissividade das bandas 31 e 32	0,002	0,490		Adimensional
	Hora da passagem do satélite	0,1			Hora
MOD09GA	Refletância da superfície	0,0001	-	500 m diária	Adimensional
	Ângulo zenital solar	0,01	-	1000 m diária	Grau
MOD07_L2	Temperatura do ar	0,01	$1,5 \times 10^4$	5 km diária	Kelvin
	Temperatura do ponto do orvalho	0,01	$1,5 \times 10^4$		Kelvin

Fonte: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>

2.2 Obtenção da radiação de onda longa

2.2.1 Método SEBAL

A radiação de onda longa incidente, emitida pela atmosfera na direção da superfície - $R_{L\downarrow}$ ($W m^{-2}$), foi obtida através da equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (1)$$

em que T_a é a temperatura do ar próximo à superfície, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$) e ε_a é a emissividade atmosférica, calculada segundo modelo proposto por Bastiaanssen et al. (1998), qual seja:

$$\varepsilon_a = a(-\ln \tau_{sw})^b \quad (2)$$

onde a e b são coeficientes de calibração cujos valores, de acordo com Bastiaanssen et al. (1998), são respectivamente iguais a 1,08 e 0,265.

A transmissividade atmosférica (τ_{sw}) foi estimada de acordo com Allen et al. (1998):

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z \quad (3)$$

onde z representa a altitude de cada pixel da imagem, que foi obtido do modelo de elevação digital – DEM gerado pelo SRTM, junto ao site <http://srtm.csi.cgiar.org>.

A radiação de onda longa emitida por cada pixel - $R_{L\uparrow}$ ($W m^{-2}$) foi calculada também segundo a equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (4)$$

onde ε_0 é a emissividade de cada pixel e T_s (K) é a temperatura da superfície, obtidos do produto MOD11A1. A emissividade da superfície foi considerada igual à média aritmética das emissividades das bandas 31 e 32, conforme proposto por Bisht et al. (2005).

2.2.2 - Método METRIC

A radiação de onda longa emitida por cada pixel foi calculada pela Equação 4, enquanto que a radiação de onda longa incidente foi estimada com a Equação 1, sendo os coeficientes a e b da Equação 2 utilizados conforme Allen et al. (2002), que são respectivamente 0,85 e 0,09.

A transmissividade atmosférica foi estimada conforme Allen et al. (2007), por:

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \exp \left[\frac{-0,00146P}{K_t \cos \theta_z} - 0,075 \left(\frac{W}{\cos \theta_z} \right)^{0,4} \right] \quad (5)$$

em que θ_z é o ângulo zenital solar, obtido do produto MOD09GA; P é a pressão atmosférica média em kPa ; k_t é o coeficiente de turbidez da atmosfera, sendo $k_t = 1$ para céu claro e $k_t = 0,5$ para turbidez extrema (Allen, 1996); W é a água precipitável (mm), calculada de acordo com equação proposta por Garrison e Adler (1990):

$$W = 0,14e_a P_{air} + 2.1 \quad (6)$$

A pressão atmosférica pode ser obtida conforme (ASCE-EWRI, 2005):

$$P = 101,3 \left(\frac{T_a - 0,0065z}{T_a} \right)^{5,26} \quad (7)$$

onde T_a (K) é a temperatura do ar e z (m) é a altitude, representada pelo DEM.

2.2.3. Método Bisht

A radiação de onda longa incidente e a radiação de onda longa emitida foram computadas através das Equações 1 e 4, respectivamente, sendo a temperatura do ar (T_a) na Equação 1, em Kelvin, obtida do produto MOD07_L2 (extraída da camada 81) e a emissividade atmosférica estimada de acordo com a Equação 8, proposta por Prata (1996):

$$\varepsilon_a = \left[1 - (1 + \xi) \exp \left\{ -(1,2 + 3\xi)^{1/2} \right\} \right] \quad (8)$$

onde $\xi = 46,5e_0/T_a$, e_0 é a pressão parcial de vapor (hPa), obtida pela equação de Clausius-Clapeyron:

$$e_0 = 6,11 \exp \left[\frac{L_v}{R_v} \left(\frac{1}{273,15} - \frac{1}{T_d} \right) \right] \quad (9)$$

que L_v é o calor latente de vaporização da água ($2,5 \times 10^6$ J kg^{-1}), R_v é a constante de vapor de água, $461,50$ $Kg^{-1} K^{-1}$ (Vianello e Alves, 1987); T_d é a temperatura do ponto do orvalho obtida do produto MOD07_L2 (extraída da camada 101), que corresponde ao nível de 920 hPa); β é 0,1, é um coeficiente que pode ser utilizado para ajustar os resultados, conforme utilizado por Bisht et al. (2010).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 estão representados os valores de radiação de onda longa medidos e estimados. Pode-se observar que para a radiação de onda longa incidente o método que apresentou os maiores erros foi o de Bisht. A diferença observada nos resultados deve-se a estimativa da emissividade atmosférica que varia nas três metodologias empregadas e, principalmente, em decorrência dos altos valores de temperatura do ar obtidos com o produto MOD07L2, que foram em geral 2 – 3 °C maiores do que a T_a observada na torres. Já a radiação de onda longa emitida foi estimada de forma igual nos três métodos, utilizando-se emissividade e temperatura da superfície, contidas no produto MOD11A1.

De posse das medições da radiação de onda longa incidente e temperatura do ar, pode-se, com a equação de Stefan-Boltzmann, calcular a emissividade atmosférica. A Tabela 2 contém os valores estimados e observados, vale ressaltar que na metodologia SEBAL a transmissividade (Equação 3) é constante para cada ponto, independentemente do dia, enquanto nas outras metodologias ela é variável.

Como pode ser observado na Tabela 1, o método SEBAL resultou no menor erro relativo médio, qual seja, de apenas de 5,36%.

Tabela 1 - Radiação de onda longa incidente medida - $R_{L\downarrow_med}$ ($W m^{-2}$), Radiação de onda longa emitida medida - $R_{L\uparrow_med}$ ($W m^{-2}$), Radiação de onda longa emitida estimada ($R_{L\uparrow_estim}$), radiação de onda longa incidente obtida pelo método SEBAL ($R_{L\downarrow S}$), radiação de onda longa incidente obtida pelo método METRIC - $R_{L\downarrow M}$ ($W m^{-2}$), radiação de onda longa incidente obtida pelo método Bisht - $R_{L\downarrow B}$ ($W m^{-2}$), Erro Relativo Percentual - ERP(%)

Radiação de Onda longa Incidente ($W m^{-2}$)							
Dia	$R_{L\downarrow_med}$	$R_{L\downarrow S}$ inc	ERP(%)	$R_{L\downarrow M}$ inc	ERP(%)	$R_{L\downarrow B}$	ERP(%)
46	366,8	349,9	4,61	343,5	6,35	442,3	20,59
52	349,2	347,2	0,58	342,4	1,97	426,4	22,09
70	402,4	361,0	10,29	358,3	10,96	447,5	11,20
89	386,5	358,6	7,22	355,4	8,04	396,7	2,63
100	388,4	359,4	7,45	357,5	7,94	447,9	15,31
102	378,8	354,5	6,40	353,0	6,82	444,5	17,36
212	326,5	334,8	2,53	332,5	1,82	383,4	17,42
228	351,0	343,8	2,07	340,4	3,02	398,5	13,51
338	368,7	346,8	5,94	341,3	7,44	424,5	15,13
360	368,7	344,6	6,54	339,8	7,83	421,0	14,17
ERM			5,36		6,22		14,94
Radiação de Onda Longa Emitida ($W m^{-2}$)							
Dia	$R_{L\uparrow_med}$	$R_{L\uparrow_estim}$	ERP(%)				
46	474,8	464,0	2,27				
52	469,6	477,0	1,58				
70	488,4	466,5	4,49				
89	483,9	456,8	5,61				
100	481,5	460,9	4,28				
102	476,1	461,6	3,05				
212	464,6	443,0	4,65				
228	488,0	453,8	7,01				
338	478,4	458,3	4,20				
360	478,4	455,5	4,79				
ERM			4,19				

Percebe-se que o desempenho menos satisfatório foi o do método Bisht, que mostra uma superestimativa da emissividade da atmosfera, o que explica o resultado, também negativo, dessa metodologia na estimativa da radiação de onda longa incidente (Tabela 1). As medições situaram-se entre $365,5 \text{ W m}^{-2}$ (DSA 212) a $402,4 \text{ W m}^{-2}$ (DSA 70). Os métodos SEBAL e METRIC promoveram subestimativas de $R_{L\downarrow}$, exceto no DSA 212, com erros de 5,4 e 6,2%, respectivamente. No entanto, o método Bisht superestimou a $R_{L\downarrow}$ em todos os dias estudados, com erro substancialmente maior, qual seja 14,9%, que os outros métodos.

Tabela 2- Emissividade atmosférica (Emiss) medida e estimada pelos métodos SEBAL (S), METRIC (M), Bisht (B) e Erro Relativo Percentual - ERP - (%)

Dia	Emiss Medida	Emiss S	ERP	Emiss M	ERP	Emiss B	ERP
46	0,796	0,771	3,18	0,757	4,94	0,985	23,69
52	0,767	0,771	0,51	0,76	0,93	0,903	17,71
70	0,851	0,771	9,39	0,765	10,10	0,979	15,05
89	0,819	0,771	5,85	0,764	6,71	0,98	19,67
100	0,820	0,771	6,02	0,767	6,51	0,965	17,62
102	0,812	0,771	5,04	0,767	5,54	0,953	17,37
212	0,741	0,771	3,99	0,766	3,32	0,888	19,77
228	0,775	0,771	0,53	0,763	1,57	0,882	13,79
338	0,79	0,771	2,41	0,759	3,92	0,96	21,52
360	0,79	0,771	2,41	0,76	3,80	0,947	19,87
ERM			3,93		4,73		18,61

Efetou-se a dispersão entre os valores medidos e estimados para a radiação de onda longa incidente. Os coeficientes de determinação (R^2) e desvios padrão (DESVPAD) estão mostrados na Figura 1.

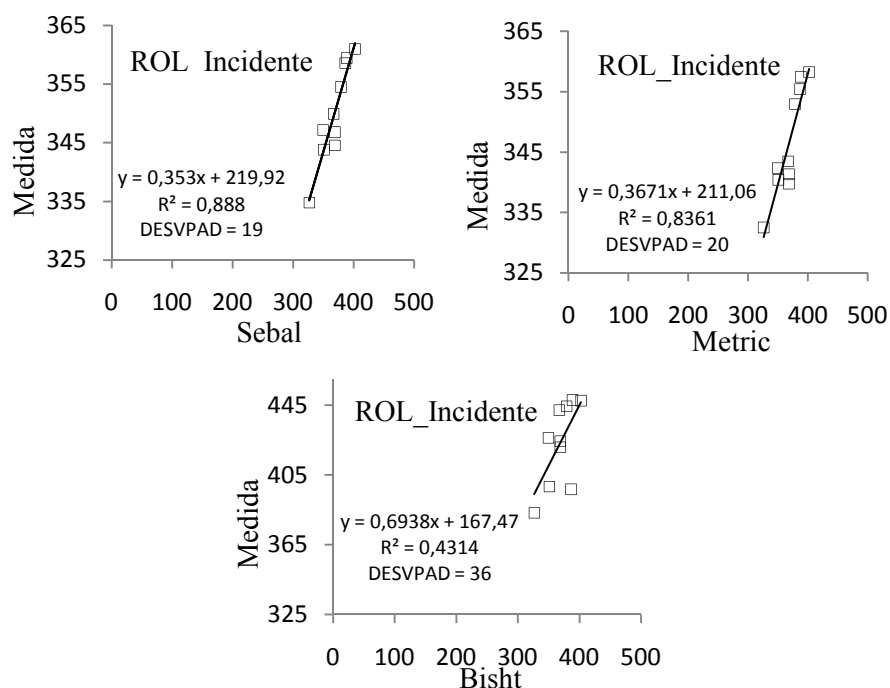


Figura 1: coeficientes de determinação (R^2) e desvios padrão (DESVPAD) para a radiação de onda longa incidente (Wm^{-2}), referentes aos dias de ordem mostrados na Tabela 1.

Os métodos SEBAL e METRIC apresentaram desvio padrão dentro da precisão aceitável ($\pm 20 \text{ Wm}^{-2}$), enquanto o método Bisht apresentou um valor 80% maior.

4. Conclusões

As metodologias empregadas mostraram-se bastante satisfatórias, havendo um melhor desempenho da metodologia SEBAL. As metodologias METRIC e SEBAL, mesmo necessitando de medidas de superfície, não são de difícil aplicação, já que para o emprego das mesmas necessita-se de medidas apenas de temperatura do ar, dado que, a depender do local em estudo, é facilmente adquirido de estação meteorológica.

A metodologia Bisht implica melhoria na estimativa da emissividade atmosférica, para conseqüentemente melhorar a estimativa da radiação de onda longa incidente, o que impactará positivamente o resultado para o saldo de radiação. Porém, o fato de a mesma não necessitar de dados de superfície mostra-se bastante atraente, já que na falta de medições de solo tem-se a opção prática e sem custo de realizar as estimativas. Sugere-se, para estudos futuros, aplicar a Metodologia Bisht utilizando a temperatura do ar de estação meteorológica. Dessa forma, avaliar o impacto da diferença de temperatura observada nos dados do sensor em relação as medidas de superfície, já que o produto MOD07_L2 é distribuído em camadas o que, a depender da altitude da área de estudo, pode implicar em diferença significativa.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas concedidas e ao prof. Dr. Humberto Rocha do IAG-USP, pelos dados da torre micrometeorológica relativos ao ano de 2005.

Referências Bibliográficas

- Allen, R. G.; Tasumi, M.; Trezza, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.133, n.4, p.380-394, 2007.
- Allen, R. G.; Trezza, R.; Tasumi M. Surface energy balance algorithms for land. Advance training and user's manual, version 1.0, p.98, 2002.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements – FAO. *Irrigation and drainage*, paper 56. Rome, Italy, 318p, 1998.
- Allen, R. G. Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.122, p.97-106, 1996.
- ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. ASCE-EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Rep., ASCE, 2005.
- BRASIL. Ministério de Mina e Energia. Secretaria de Minas e Metalurgia. Serviço Geológico do Brasil. Superintendência Regional de São Paulo. Atlas Ambiental das Bacias dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo, SP: subsídios para o planejamento territorial e gestão ambiental. Coordenadoria de Planejamento Ambiental, 77p, 2000.
- Bastiaanssen, W. G. M.; Menenti, M.; Feddes, R. A.; Holtslag, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1: Formulation. *Journal of Hydrology*, v.212–213, p.198–212, 1998.

Bisht, G.; Bras, R. L. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study. *Remote Sensing of Environment*, v.114, n.7, p.1522-1534, 2010.

Bisht, G.; Venturini, V.; Islam, S.; Jiang, L. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear-sky days. *Remote Sensing of Environment*, v.97, n.1, p.52-67, 2005.

Garrison, J. D.; Adler, G. P. Estimation of precipitable water over the United States for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. *Solar Energy*, v.44, 225-241, p.1990.

Gomes, H. F. Balanços de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais, 2009. 119p. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2009.

Gupta, S. K.; Kratz, D. P.; Wilber, A. C. (2004). Validation of parameterized algorithms used to derive TRMM-CERES surface radiative fluxes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(5), 742 – 752.

NASA - MODIS Atmosphere, disponível em :
<<http://www.modis.gsfc.nasa.gov>>, acessado em julho de 2010.

PRATA, A. J. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.122, 1127-1151, 1996.

Pivello, V.R.; Bitencourt, M.D.; Mantovani, W.; Mesquita Jr. H.N.; Batalha, M.A.; Shida, C. Proposta de zoneamento ecológico para a reserva de cerrado Pé-de-Gigante (Santa Rita do Passa Quatro, SP). *Revista Brasileira de Ecologia*, v.2, p.108-118, 1998.

Rocha, H. R.; Freitas, H. C.; Rosolem, R.; Negrón-Juárez, R. I.; Tannus, R.; Ligoma, Cabral O. M.; Dias, M. A. F. Measurements of CO₂ exchange over a woodlandsavanna (Cerrado sensu stricto) in southeast Brazil. *Biota Neotropica*, v.2, n.1, p.1-11, 2002.

Ruggiero, P. G. C.; Pivello, V. R.; Sparovek, G.; Teramoto, E.; Pires Neto, A. G. Relação entre solo, vegetação e topografia em área de cerrado (Parque Estadual de Vassununga, SP): como se expressa em mapeamentos? *Acta Botânica Brasilica*, v.20, n.2, p.383-394, 2006.

Santos, F.A.C. Alterações no balanço radiativo e impactos climáticos decorrentes do uso da terra no estado de São Paulo, 2011. 84p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB. 2001.

Suttles, J. T., and G. Ohring, 1986: Surface radiation budget for climate applications. NASA Ref. Publ. 1169, 132 pp.

Vianello, R. L.; Alves, A. R. Meteorologia básica e aplicação. Universidade Federal de Viçosa, 1987. 449p.

Wang, W.; Liang, S. Estimation of high-spatial resolution clear-sky longwave downward and net radiation over land surfaces from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, v.113, p.745-754, 2009.